

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2013. Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih in hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben = Comparison between two adjacent experimental torrential watersheds: Kuzlovec and Mačkov graben. Acta hydrotechnica 26,45: 85–97.

<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a45nb.pdf>
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5245/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 7-9-2015

UDK/UDC: 556.51:627.152.3(497.4)

Prejeto/Received: 22. 09. 2014

Kratki znanstveni prispevek – Short scientific paper

Sprejeto/Accepted: 08. 01. 2015

**PRIMERJAVA DVEH SOSEDNJIH EKSPERIMENTALNIH
HUDOURNIŠKIH POREČIJ: KUZLOVEC IN MAČKOV GRABEN**
**COMPARISON BETWEEN TWO ADJACENT EXPERIMENTAL
TORRENTIAL WATERSHEDS: KUZLOVEC AND MAČKOV GRABEN**

**Nejc Bezak^{1,*}, Mojca Šraj¹, Simon Rusjan¹, Mojca Kogoj¹, Andrej Vidmar¹, Matej Sečnik¹,
Mitja Brilly¹, Matjaž Mikoš¹**

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Izvleček

Eksperimentalna porečja, ki so pogosta tudi v svetovnem merilu, so pomemben dejavnik pri razvoju hidrologije, saj nam omogočajo opazovanje in proučevanje različnih procesov, kot so padavine, površinski odtok, premeščanje sedimentov, procesi erozije, itd. V prispevku so predstavljeni nekateri merski instrumenti, s katerimi smo opremili dve sosednji eksperimentalni porečji (Mačkov graben ter Kuzlovec) ter njuno okolico. Obe porečji sta del porečja reke Gradaščice, ki se izliva v Ljubljano, slednja pa je del porečja reke Save. V članku so prikazani nekateri preliminarni rezultati analiz izmerjenih podatkov s poudarkom na suspendiranih snoveh. Ugotovili smo, da do nastopa maksimalne vrednosti koncentracij suspendiranih snovi v povprečju pride pred nastopom konice pretoka, kar je pogosto značilnost manjših porečij, kjer so potencialni viri sedimentov locirani blizu struge oz. v strugi sami. Poleg tega je očitno, da imajo izraziti padavinski dogodki velik vpliv na premeščanje suspendiranih snovi. Meritve s časovnim korakom krajšim od ½ ure se bodo na obeh eksperimentalnih porečjih nadaljevale, s čimer bomo pridobili kvalitetne podatke, s katerimi bomo lahko nadgradili znanje o hidroloških procesih.

Ključne besede: eksperimentalna porečja, hudourniška območja, padavine, pretoki, suspendirane snovi, merski instrumenti.

Abstract

Experimental watersheds, which are frequent around the world, are important for improving our hydrological knowledge. Different hydrological processes such as precipitation, surface runoff, suspended sediment transport, erosion processes, are usually observed in the experimental watersheds. This paper presents some measuring equipment used in two experimental watersheds, namely Kuzlovec and Mačkov graben. Both catchments are part of the Gradaščica river basin, which drains into the Ljubljana river that is part of the Sava river basin. Some preliminary analysis results are also presented. One of the main conclusions was that the suspended sediment concentration peak occurs on average before the peak discharge, which is often the case for small watersheds. Here sediment sources are located near the channels or in the channel itself. Furthermore, significant precipitation events have a large influence on the suspended sediment

* Stik / Correspondence: nejc.bezak@fgg.uni-lj.si

© Bezak N. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Bezak N. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence.](#)

concentrations. Measurements with precise time step on both experimental watersheds will continue in the future. Measured data will be used as a basis for upgrading the knowledge about hydrological processes.

Keywords: experimental watersheds, torrent, precipitation, discharge, suspended sediments, measuring equipment.

1. Uvod

Eksperimentalna porečja (*ang.* experimental river basins), poimenovana tudi eksperimentalna povodja (*amer. ang.* experimental watersheds; *brit. ang.* experimental catchments) so temelj za razvoj hidrologije kot znanstvene vede s področja geofizikalnih ved in pridobitev novih spoznanj o procesih, ki so (ne)posredno povezani z vodo in kroženjem vode na Zemlji (vodnim krogom). Na eksperimentalnem porečju uporabljamo zanesljivo in robustno mersko opremo, ki omogoča zajem podatkov v različnih časovnih korakih in s katero lahko opazujemo npr. padavine, procese generiranja površinskega odtoka, kakovost vode, erozijske pojave, dinamiko podzemne vode, torej dinamiko naravnih procesov, lahko pa tudi vpliv človekovih posegov v naravno okolje, npr. v gozdove (Mikoš, 1994).

Porečje reke Reke je bilo prvo izmed večjih eksperimentalnih porečij na območju Slovenije, kjer so se meritve začele pred več kot 15 leti (Brilly et al., 2000; 2002; 2005; Šraj et al., 2008b). Kasneje je sta bili vzpostavljeni še eksperimentalni porečji Dragonje (Globevnik, 2001; Petkovšek, 2002; Petkovšek et al., 2003; Petkovšek in Mikoš, 2003; Šraj et al., 2008a; Petan, 2010) ter Gradaščice z Glinščico (Brilly et al., 2005; Rusjan et al., 2003). Brilly et al. (2005) je predstavil vsa tri eksperimentalna porečja in mersko opremo, ki je bila uporabljena. Z uporabo pridobljenih podatkov na eksperimentalnih porečjih so bile podrobno obdelane številne tematike, kot so npr. erozijski procesi (Petkovšek, 2002), prestrežene padavine (Šraj et al., 2008a), sproščanje nitratov (Rusjan et al., 2008), itd. Globevnik (2001) je prikazala karakteristike celostnega pristopa k upravljanju s porečji na primeru porečja Dragonje, ki ga je obravnaval tudi Petkovšek (2002), ki je opazoval in modeliral erozijske procese. Šraj (2003) je obravnavala proces prestrezanja padavin na istem porečju, ki je pomemben dejavnik v vodnem krogu, saj gre za hidrološko spremenljivko, ki

neposredno določa odtok s porečja. Rusjan (2008) je analiziral časovno dinamiko sproščanja hranil z gozdnatega prispevnega območja, kjer so bile terenske meritve izvedene v območju potoka Padež. Petan (2010) se je ukvarjal z meritvami in modeliranjem intenzitete padavin, določil pa je tudi karto erozivnosti padavin za Slovenijo.

Podobna eksperimentalna porečja so pogosta tudi v drugih državah (npr. Lenzi et al., 1999; Brocca et al., 2011; Coenders-Gerrits et al., 2013), kar pomeni, da je predstavljena tematika eksperimentalnih porečij aktualna. Seveda so terenske meritve predpogoj za nadgradnjo znanja o hidroloških procesih. V Evropi so se sicer prva eksperimentalna porečja pojavila že v začetku 20. stoletja (Warmerdam in Stricker, 2010).

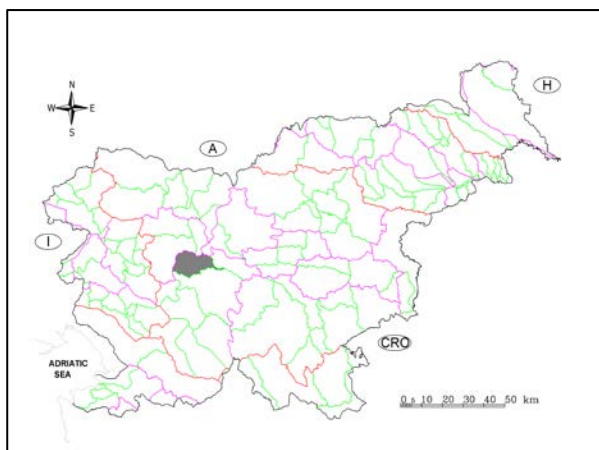
V nadaljevanju prispevka bosta najprej predstavljeni dve eksperimentalni hudourniški porečji, ki sta del vodnega telesa reke Gradaščice (Kuzlovec in Mačkov graben). Opisana bo uporabljena merska oprema ter rezultati preliminarnih analiz pridobljenih (izmerjenih) hidroloških podatkov.

2. Predstavitev eksperimentalnih porečij Mačkov graben in Kuzlovec

Izbrani eksperimentalni porečji Mačkov graben in Kuzlovec sta del porečja reke Gradaščice (sliki 1 in 2). Oba hudourniška potoka se iztekata v Veliko Božno (Božno), ki se pri Polhovem Gradcu združi z Malo vodo. Od sotočja naprej se reka imenuje Gradaščica. Slednja teče v osrednjem delu Slovenije, med dinarskim in alpskim svetom in se pri Bokalškem jezu v Ljubljani razdeli na Mestno Gradaščico ter Mali Graben. Mestna Gradaščica in Mali Graben se v Ljubljani izlivata v reko Ljubljanico, ki je del porečja reke Save.

Porečje Gradaščice je večinoma hribovito, saj del območja sestavlja Polhograjsko hribovje z vrhovi tudi preko 1000 m (pomembnejši vrhovi so Tošč, Pasja ravan, Špik, Grmada, Gabrovec). To se

odraža v hudourniškem odzivu vodotokov (hiter nastop konice pretoka in tudi relativno hitro zmanjševanje pretokov), kjer so manj obsežne poplave relativno pogoste, lahko pa nastopijo tudi katastrofalne poplave, kot so bile npr. poplave leta 1924 ali 1926 (Jesenovec, 1994). Razgiban teren s strmimi pobočji in ozkimi dolinami je značilen tudi za izbrani eksperimentalni hudourniški območji (Mačkov graben ter Kuzlovec).



Slika 1: Lokacija porečja Gradaščice na karti Slovenije z označenimi hidro-geografskimi območji

Figure 1: Location of the Gradaščica watershed on the map of Slovenia with hydro-geographical areas

V preglednicah 1 in 2 so prikazane nekatere geološke, pedološke, topografske ter hidrografske značilnosti hudourniških območij Mačkov graben in Kuzlovec. Porečje Gradaščice obsega 158,8 km², izbrani eksperimentalni porečji pa predstavljata le majhen del celotnega porečja reke Gradaščice (preglednici 1 in 2). Hudourniško obnašanje obeh vodotokov je značilno za Mačkov graben in Kuzlovec (preglednici 1 in 2). Prevladujoča raba tal je v obeh primerih gozd, na obeh območjih je geološka sestava relativno podobna, prevladujoča prst pa je rendzina na apnencu in dolomitu (preglednici 1 in 2). Geološka podlaga je relativno erodibilna, kar pomeni, da lahko pri ekstremnih hidrometeoroloških pogojih

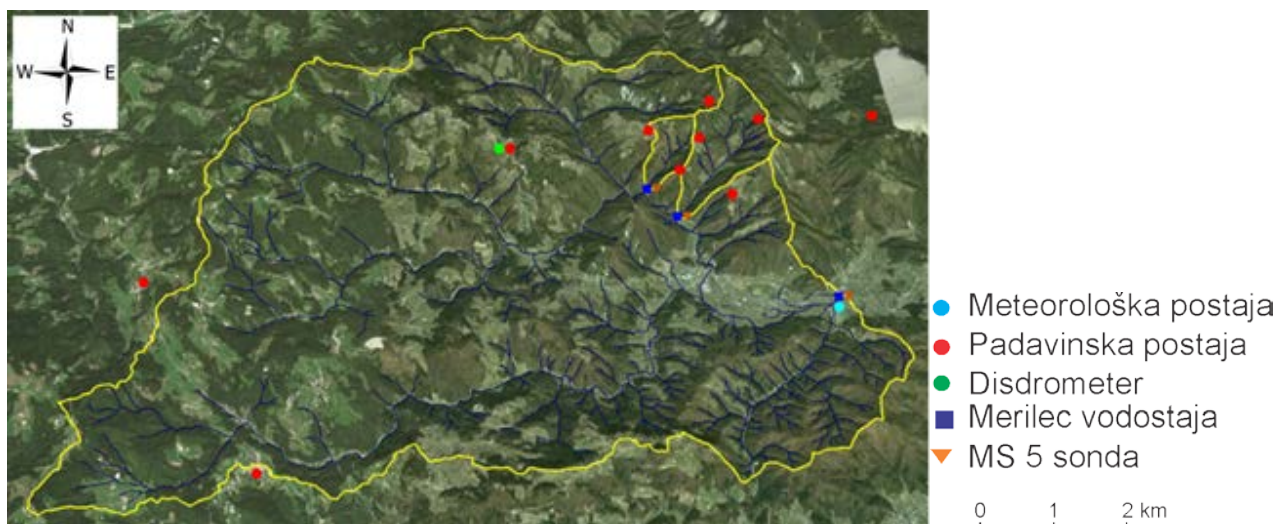
pričakujemo izrazite erozijske procese. Na hudourniškem območju Kuzlovca skoraj ni antropogenih vplivov, medtem ko so ti nekoliko izrazitejši na hudourniškem območju Mačkovega grabna.

Preglednica 1: Osnovne lastnosti eksperimentalnega porečja Mačkov graben

Table 1: Basic characteristics of the Mačkov graben experimental watershed

Prispevna površina	2,33 km ²
Nadmorska višina (min, max, srednja)	384 m; 1015 m; 649 m n.v.
Naklon porečja (max, povprečje)	58,5° (163,5%); 30,5° (59%)
Lega	SW
Letna količina padavin	1600-1800 mm
Dolžina glavne struge	1780 m
Naklon struge (povprečje)	9,3 %
Pokrovnost in raba prostora (CLC)	Mešani gozd (40,4 %), listati gozd (28 %), pretežno kmetijske površine z večjimi območji naravne vegetacije (11,6 %)
Geologija	Laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec; neplastovit dolomit; svetlo siv kristalast dolomit; Grödenski skladi - rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat
Pedologija	Rendzina na apnencu in dolomitu

Slika 3 prikazuje digitalni model višin (DMV) eksperimentalnega porečja Mačkov graben ter struge vodotokov, slika 4 pa izbrano eksperimentalno območje na modelu terena (Google Zemlja, 2014). Slika 4 potrjuje, da je območje gozdnato in razgibano. Gozd namreč predstavlja skoraj 70% površine (preglednica 1).



Slika 2: Lokacija eksperimentalnih porečij Kuzlovec ter Mačkov graben na porečju Gradaščice

Figure 2: Location of the Kuzlovec and Mačkov graben torrents in Gradaščica River watershed

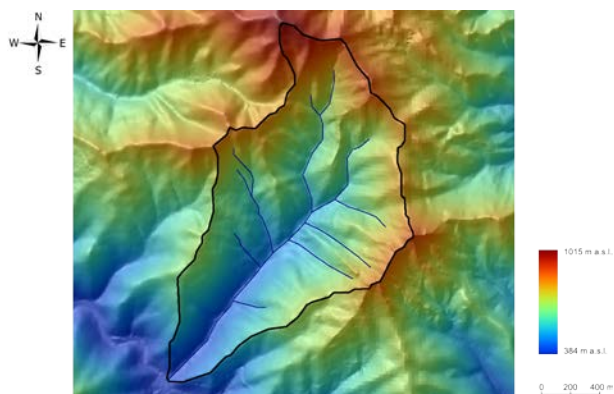
Preglednica 2: Osnovne lastnosti eksperimentalnega porečja Kuzlovec

Table 2: Basic characteristics of the Kuzlovec experimental watershed

Prispevna površina	0,71 km ²
Nadmorska višina (min, max, srednja)	394 m; 847 m; 631 m n.v.
Naklon porečja (max, povprečje)	46,5° (105,3%); 27,3° (51,6%)
Lega	SW
Letna količina padavin	1600-1800 mm
Dolžina glavne struge	1300 m
Naklon struge (povprečje)	22,2 %
Pokrovnost in raba prostora (CLC)	Mešani gozd (38,3 %), listati gozd (43,7 %), pretežno kmetijske površine z večjimi območji naravne vegetacije (18 %)
Geologija	Laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec; neplastovit dolomit; Grödenski skladi - rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat; temno siv apnenec in dolomit
Pedologija	Rendzina na apnencu in dolomitu

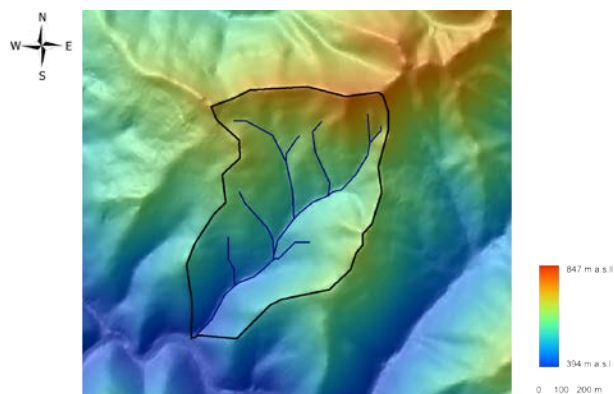
Na sliki 5 je ena izmed zaplavnih hudourniških pregrad, ki so zgrajene v hudourniškem območju Mačkovega grabna kot eden izmed ukrepov za zmanjšanje poplavne ter erozijske ogroženosti. Zaplavna prostornina vseh omenjenih pregrad je izkoriščena, zaplavni prostor se ne prazni, kar pomeni, da za hudourniški pregradami ne prihaja do usedanja dotekajočih hudourniških plavin in tako te pregrade ne zmanjšujejo erozijske ogroženosti. Ker gre za območje, kjer so erozijski procesi izraziti, zapolnjenost pregrad verjetno ni posledica antropogenih vplivov.

DMV porečja Kuzlovec prikazuje slika 6, porečje pa je označeno še na modelu terena (Google Zemlja, 2014) na sliki 7. Podobno kot pri Mačkovem grabnu lahko tudi pri Kuzlovcu potrdimo ugotovitve o prevladujoči rabi tal, ki smo jih določili na podlagi karte pokrovnosti CLC Corine. Na Kuzlovcu gozd namreč predstavlja več kot 80 % celotne površine. Slika 8 prikazuje strugo hudournika Kuzlovec, kjer lahko opazimo, da se v bližini struge nahaja veliko kamninskega drobirja, zemeljskih usedlin ter zapadlega lesa, ki jih hudournik ob ekstremnih dogodkih premešča dolvodno v Veliko Božno. Tudi na porečju Kuzlovca sta postavljeni dve hudourniški pregradi. Tudi pri teh dveh pregradah je zaplavni prostor zapolnjen s hudourniški plavinami. Za oba hudournika je značilen stalni tok, kar pomeni da je voda v vodotoku prisotna v vseh štirih letnih časih.



Slika 3: Digitalni model višin (DMV) eksperimentalnega porečja Mačkov graben

Figure 3: Digital elevation model (DEM) of the Mačkov graben experimental watershed



Slika 6: Digitalni model višin (DMV) eksperimentalnega porečja Kuzlovec

Figure 6: Digital elevation model (DEM) of the Kuzlovec experimental watershed



Slika 4: Eksperimentalno območje hudournika Mačkov graben na modelu terena (Google Zemlja, 2014)

Figure 4: Mačkov graben experimental watershed (Google Earth, 2014)



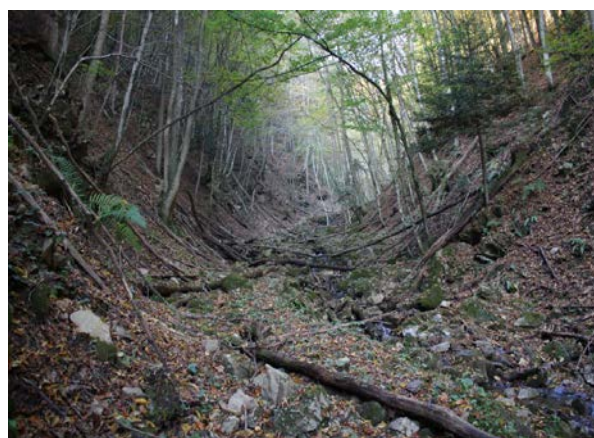
Slika 7: Prispevno območje hudournika Kuzlovec na modelu terena (Google Zemlja, 2014)

Figure 7: Kuzlovec experimental watershed (Google Earth, 2014)



Slika 5: Hudourniška pregrada v strugi hudournika Mačkov graben

Figure 5: Check dam in the Mačkov graben torrent channel



Slika 8: Struga hudournika Kuzlovec

Figure 8: Kuzlovec torrent channel

3. Metodologija in predstavitev uporabljenih merilne opreme

Za opazovanje hidroloških procesov je na porečju Gradaščice postavljena sodobna merska oprema. Lokacija posameznih merilnih instrumentov je prikazana na sliki 9. Uporabljena je naslednja merilna oprema:

- 6 avtomatičnih dežemerov (Onset RG2-M), ki so postavljeni v okolici Kuzlovca ter Mačkovega grabna;
- 2 tlačni sonde (Onset HOBO), ki sta locirani na iztoku iz Mačkovega grabna in Kuzlovca, ter služita merjenju vodostajev ter temperature vode in zraka;
- Sonda za meritve kakovosti vode (Hydrolab MS5), ki se ob ekstremnih dogodkih namesti na porečju Kuzlovca, in omogoča meritve pH, raztopljenega kisika, motnosti, nitratov, temperature ter številnih drugih parametrov;
- 2 disdrometra (Thies Clima ter OTT Parsivel) sta locirana nekaj kilometrov od obeh eksperimentalnih povodij (Ljubljana ter Črni Vrh nad Polhovim Gradcem) ter merita intenziteto padavin, velikost, porazdelitev in hitrost padavinskih delcev.

Za določitev pretočne krivulje se izvajajo tudi občasne meritve pretokov z uporabo merilnikov, ki pretok izmerijo na podlagi metode razredčenja (Flo-tracer) ter na podlagi Dopplerjevega efekta (FlowTracker). Večinoma gre za podobno opremo (uporabljene so nekatere novejšje različice merskih instrumentov), ki je bila uporabljena pri drugih eksperimentalnih porečjih (npr. Brilly et al., 2005; Rusjan, 2008; Rusjan et al., 2008; Šraj et al., 2008a; Petan et al., 2010). Primerjavo obeh merilnih instrumentov je naredila Cvetko (2013).

Dežemeri 1, 2, 3 in 4 so bili na terenu postavljeni poleti 2012, dežemera 5 ter 6 pa proti koncu leta 2012 (slika 9). Meritve vodostajev, temperature vode in zraka na iztoku iz Kuzlovca ter Mačkovega grabna so se začele poleti leta 2013 (slika 9). Meritve kakovosti vode s Hydrolab MS5 sondo so se prav tako začele poleti 2013 (slika 9), v istem obdobju je bil postavljen tudi disdrometer v Ljubljani na UL FGG, medtem ko disdrometer na

Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem meritve zagotavlja od poletja 2014. Občasne meritve pretokov za potrebe vzpostavitve pretočnih krivulj so potekale od poletja 2013 do spomladi 2014 ob različnih hidroloških pogojih (izvedenih je bilo več kot 10 meritev ob različnih vodostajih). Dežemeri 1, 2, 3, 4, 5 in 6 so postavljeni na nadmorskih višinah 630 m, 814 m, 774 m, 768 m, 661 m in 444 metrov. Disdrometer v Ljubljani se nahaja na nadmorski višini 292 metrov, disdrometer na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem pa na nadmorski višini 810 metrov.

Za meritve padavin se uporabljajo dežemeri Onset RG2-M, ki jih pogosto imenujemo tudi prekucniki (ang. *tipping bucket*). Za zagotovitev ustreznosti meritev je potrebno vsak dežemer umeriti. Slika 10 prikazuje dežemer med postavljanjem. Kapaciteta spominskega modula (ang. *data logger*) dežemera omogoča zapis 8000 dogodkov in ker vsak dogodek oz. prekuc mehanizma predstavlja 0,2 mm padavin (taka količina je določena s kalibracijo), to pomeni da lahko dežemer izmeri 1600 mm padavin (podatki se na spominski modul zapišejo ob padavinskem dogodku), potem pa je potrebno spominski modul sprostiti. Omenjeni dežemeri ne potrebujejo zunanega napajanja, spominski modul pa za zapis podatkov uporablja baterijo (CR2032).



Slika 10: Dežemer številka 6 med postavljanjem

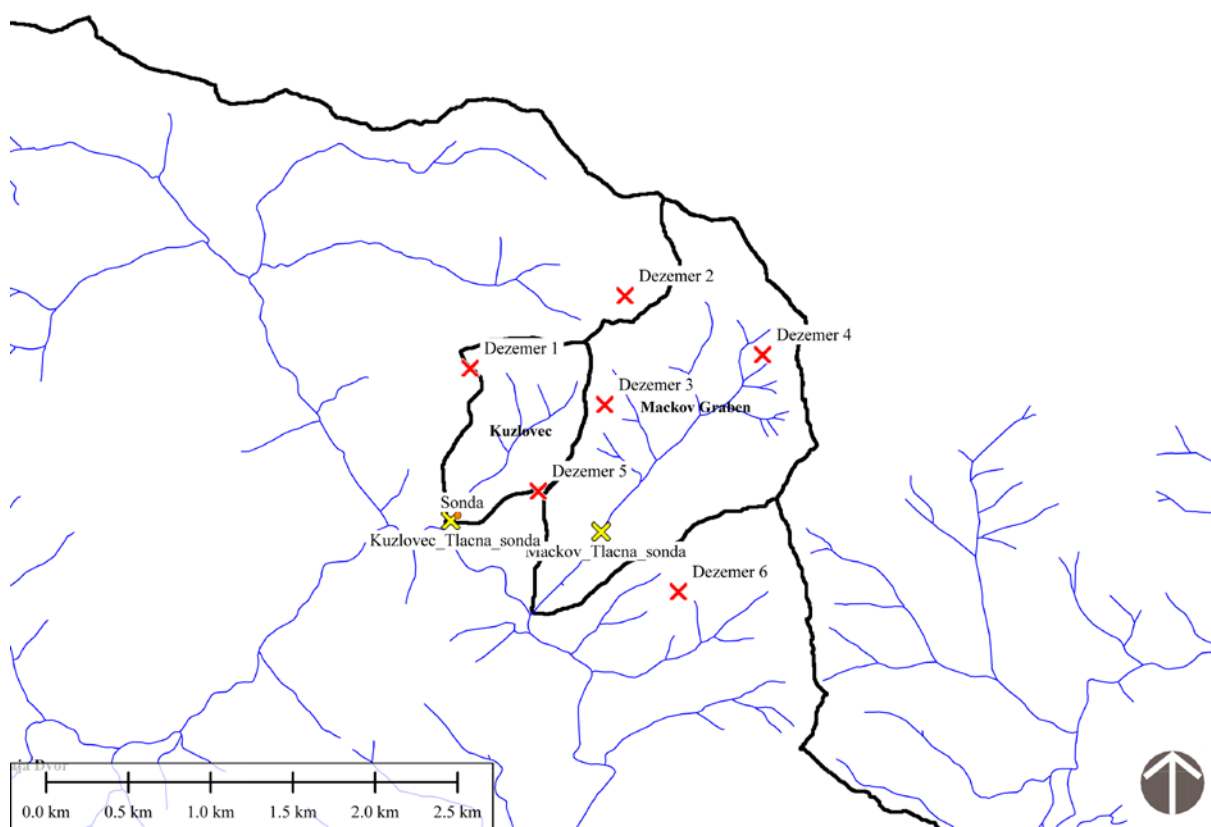
Figure 10: Rain gauge number 6 during installation process

Za meritve intenzitete padavin ter porazdelitve padavinskih delcev se uporabljata disdrometra, ki

sta locirana v Ljubljani (slika 11) ter Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem (slika 12). V Ljubljani je postavljen disdrometer proizvajalca OTT Parsivel, na Črnem Vrhu pa disdrometer proizvajalca Thies Clima. Podatki se zapisujejo na spominsko kartico (2 GB), izbran interval merjenja pa je 1 minuta. Oba instrumenta sta že bila uporabljena za opazovanje erozivnosti padavin na območju Slovenije (Petan et al., 2010). Petan (2010) pa je podal tudi nekoliko natančnejši opis prej omenjene merilne opreme ter metodologije merjenja. Osnovni princip delovanja obeh disdrometrov je drugačen kot pri običajnih dežemerih (prekucnikih), saj disdrometer določi količino, hitrost in porazdelitev padavinskih delcev na podlagi algoritma, ki upošteva spremembo napetosti, kot posledico prekinitve žarka (zaradi padavin) med sprejemno in odbojno glavo

disdrometra, zato se tudi izmerjene količine padavin razlikujejo od tistih, ki jih izmeri dežemer na sliki 13 (Petan, 2010). Na podlagi začetnih meritev lahko ocenimo, da so te razlike lahko tudi do 25 %.

Za meritve vodostajev ter temperature zraka in vode na iztoku iz Kuzlovca ter Mačkovega grabna se uporablja sonda proizvajalca Onset HOBO. Ena izmed sond meri vodni tlak (na sliki 13 je locirana v vodotoku), druga pa zračni tlak (barometrični; na sliki 13 je locirana na drevesu). Na podlagi teh podatkov je mogoče določiti vrednosti vodostajev. Zaradi tega sta v obeh porečjih postavljeni po dve sondi (ena v vodi ter ena v zraku). Izbrani interval merjenja je 10 minut, spominski modul pa omogoča zapis približno 20.000 (64 kB) dogodkov (meritev). Slika 13 prikazuje mikro-lokacijo obeh sond na eksperimentalnem porečju Kuzlovec.



Slika 9: Lokacija merilnih mest na porečju Gradaščice

Figure 9: Location of the measuring sites in the Gradaščica watershed



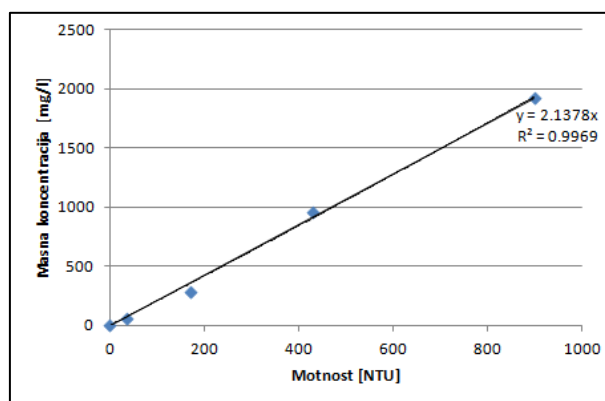
Slika 11: Disdrometer OTT Parsivel v Ljubljani
Figure 11: Disdrometer OTT Parsivel in Ljubljana



Slika 12: Disdrometer Thies Clima in avtomatični dežemer na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem
Figure 12: Disdrometer Thies Clima and tipping bucket rain gauge in Črni Vrh nad Polhovim Gradcem



Slika 13: Lokacija vodne ter zračne sonde na eksperimentalnem porečju Kuzlovec
Figure 13: Location of the water and air data loggers in the Kuzlovec experimental watershed



Slika 14: Zveza med masno koncentracijo suspendiranih snovi (mg/l) in motnostjo (NTU)
Figure 14: Relationship between mass concentration of suspended solids (mg/l) and turbidity (NTU)

Meritve motnosti se izvajajo s Hydrolab MS5 sondo, ki meri različne parametre, kot so motnost, pH, temperatura vode. Hydrolab MS5 sonda je prenosna naprava, ki za obratovanje ne potrebuje zunanjega napajanja, saj se napaja z uporabo 8 običajnih AA baterij, čas delovanja brez potrebe po menjavi baterij pa je odvisen od časovnega koraka meritev ter števila izbranih parametrov, ki jih sonda meri. Za določitev koncentracije suspendiranih snovi na podlagi meritev motnosti je treba vzpostaviti zvezo med tema spremenljivkama (motnostjo in koncentracijo suspendiranih snovi), kot prikazuje slika 14. Za določitev povezave med motnostjo ter masno koncentracijo suspendiranih snovi smo na terenu vzeli 5 vzorcev. Za vsakega od petih vzorcev smo določili motnost z uporabo Hydrolab sonde. Za izračun masne koncentracije so bili vzorci filtrirani, sušeni, s tehtanjem pa smo določili maso delcev, ki so ostali na filtrirnem papirju. Slika 15 prikazuje mikro-lokacijo prenosne Hydrolab sonde. Izbrani časovni korak meritev je 20 minut.



Slika 15: Lokacija Hydrolab MS5 sonde na eksperimentalnem porečju Kuzlovca

Figure 15: Location of the Hydrolab MS5 sonde in the Kuzlovec torrent

4. Rezultati in razprava

Primer analize jesenskega dogodka (september leta 2013) je prikazan na sliki 16, kjer so prikazani podatki, ki so bili izmerjeni na porečju Kuzlovca. Padavinski podatki so prikazani s časovnim korakom 20 minut. Padavinski dogodek se je začel 9.9.2013 ob 5:20 ter trajal do 10.9.2013 ob 1:00, prikazani pa so podatki od nedelje 8.9.2013 ob 18:00 do torka 10.9.2013 ob 4:00. V tem obdobju je dežemer 1 izmeril 62.8 mm padavin, dežemer 3 66.6 mm padavin, dežemer 6 pa 71.2 mm. Povprečna intenziteta padavin je znašala približno 3.2-3.5 mm/h, medtem ko je bila maksimalna intenziteta padavin za dežemera 1 in 3 približno 15 mm/h (določena na podlagi 20 minutnih padavinskih podatkov). Opazimo lahko, da do nastopa konice koncentracije suspendiranih snovi pride pred nastopom konice pretoka. Pri drugi (večji) konici (slika 16) je razlika med nastopom konice pretoka ter konice koncentracije suspendiranih snovi 70 minut. Slika 17 prikazuje pozitivno histerezo med koncentracijami suspendiranih snovi ter pretokom (maksimalne vrednosti koncentracij suspendiranih snovi nastopijo pred konico pretoka). Taka dinamika obeh procesov je značilna predvsem za manjša porečja (npr. Soler et al., 2008), na kar kažejo tudi naše preliminarne ugotovitve, ki so prikazane na slikah 16 ter 17. Podobno obnašanje je značilno tudi za druge dogodke, izmerjene na porečju Kuzlovec, kjer je časovni zamik znašal med 20 minutami in 4 urami. Izmerili smo 11 dogodkov, ki so se zgodili v vseh štirih letnih časih v letih 2013 ter 2014. Potencialni viri sedimentov se v predstavljenem primeru nahajajo v bližini struge oziroma v strugi sami. Tako lahko pojasnimo tudi relativno ozke doline, ki so jih izoblikovali vodotoki na območju Polhograjskega hribovja. Negativno histerezo oz. pojav, ko do nastopa konice pretoka pride pred nastopom konice koncentracij suspendiranih snovi, lahko opazimo pri porečjih, kjer so glavni viri sedimentov oddaljeni od struge vodotoka (npr. Bača, 2008). Poleg tega smo na podlagi meritev različnih hidrometeoroloških parametrov ugotovili, da imajo meteorološki pojavi (ekstremne padavine) velikih intenzitet velik vpliv na fluvialno premeščanje

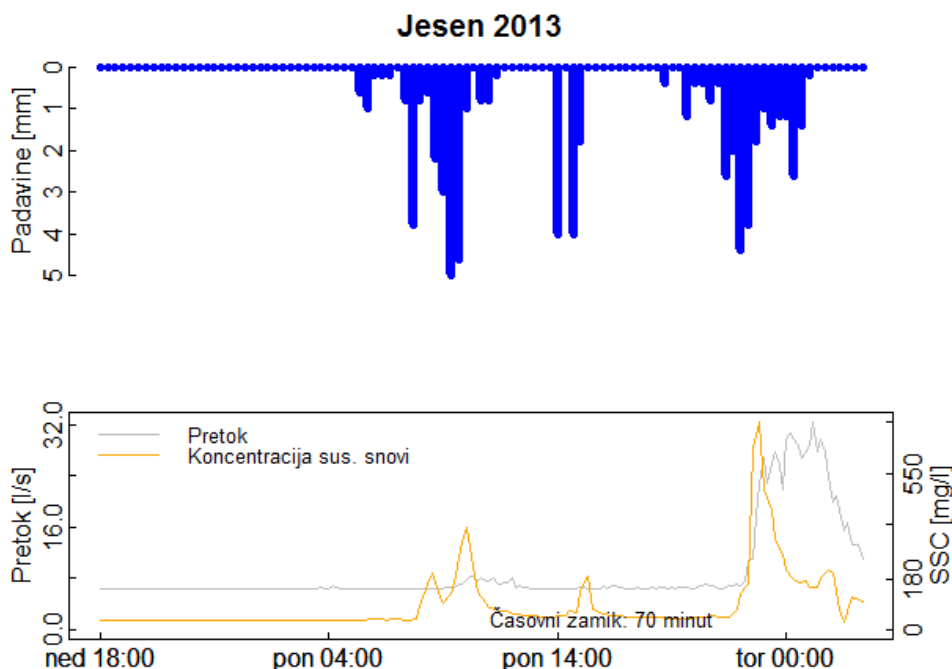
suspendiranih snovi (npr. Bača, 2008, Soler et al., 2008).

Izračunali smo tudi Pearsonov koeficient korelacije med vrednostmi padavin (dežemer številka 1), pretoki ter koncentracijami suspendiranih snovi prikazanimi na sliki 16 za prikazan dogodek, ki se je zgodil v septembru 2013 (približno 36 urno obdobje). Izračune korelacijskih koeficientov smo opravili tudi z zamikanjem podatkov, saj smo s tem opazovali, pri kakšnem zamiku je korelacija med omenjenimi spremenljivkami maksimalna. Ugotovili smo, da je odvisnost med padavinami in koncentracijami suspendiranih snovi izrazitejša kot odvisnost med pretokom in koncentracijami suspendiranih snovi. Največjo vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije med padavinami ter koncentracijami suspendiranih snovi smo dobili pri časovnem zamiku 60 minut (koeficient korelacije je znašal 0,78), odvisnost med pretoki in koncentracijami pa je bila maksimalna pri časovnem zamiku 70 min, kjer je Pearsonov koeficient korelacije znašal 0,71.

V približno 14 mesecih (od junija 2013 do avgusta 2014) smo izmerili 11 dogodkov (razporejenih v

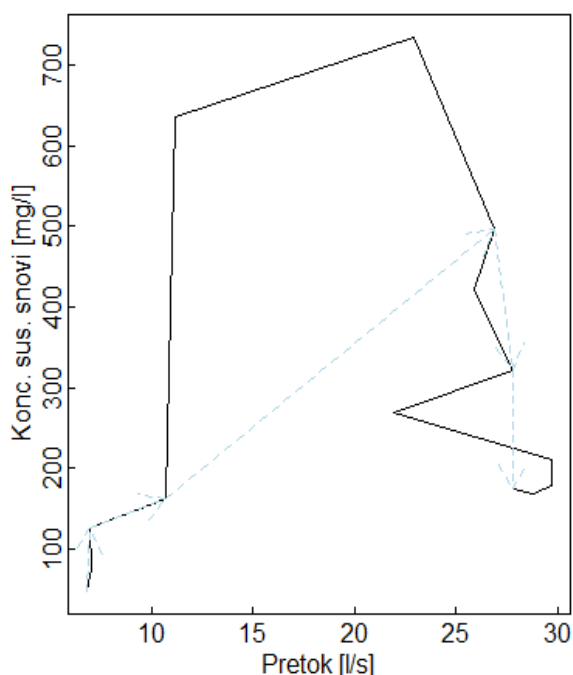
vseh štirih letnih časih), kjer smo pri vseh dogodkih z izjemo enega opazili, da do nastopa koncentracije suspendiranih snovi pride pred nastopom konice pretoka, časovni zamiki pa so znašali od 20 minut do 4 ure. Prav tako smo pri vseh dogodkih opazili, da so izmerjene vrednosti padavin dober indikator koncentracij suspendiranih snovi, v veliko primerih celo boljši kot vrednosti pretokov.

Slika 18 prikazuje primerjavo izmerjenih padavin med dežemeri številka 1, 3 in 6 v obdobju med junijem ter oktobrom leta 2013. Prikazane so padavine v 20 minutnih časovnih intervalih. Dežemer številka 3 je v tem obdobju izmeril 470 mm padavin, dežemer 6 511 mm, dežemer 1 pa 433.4 mm padavin. Razliko lahko pojasnimo z dejstvom, da gre za poletno obdobje, ko so pogoste lokalne poletne nevihte. Maksimalne 20 minutne padavine so bile v tem obdobju 12,8 mm in 16,2 mm za dežemera 3 in 6, medtem ko je pri dežemeru 1 maksimalna 20 minutna vsota padavin znašala 12.2 mm.



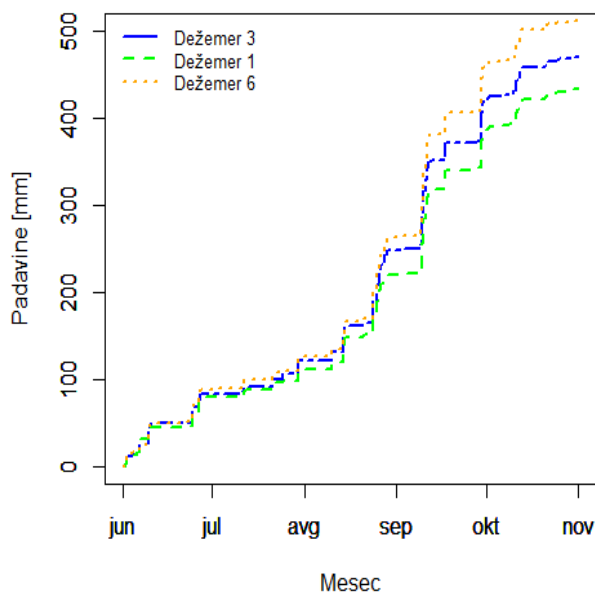
Slika 16: Primer analize hidrološkega dogodka, ki se je zgodil med 8.9.2013 ter 10.9.2013, na porečju Kuzlovca

Figure 16: Example of the hydrologic event, which occurred between 8.9.2013 and 10.9.2013, in the Kuzlovec torrent



Slika 17: Prikaz pozitivne histereze (svetlo modra črte) za hidrološki dogodek, ki se je zgodil jeseni leta 2013 na porečju Kuzlovca

Figure 17: Presentation of the positive hysteresis (light blue lines) effect for the autumn 2013 hydrologic event in the Kuzlovec torrent



Slika 18: Primerjava med dežemeri številka 1, 3 in 6 za obdobje od junija do oktobra leta 2013

Figure 18: Comparison between raingauges 1, 3 and 6 for the period between June and October 2013

5. Zaključki

V prispevku sta predstavljeni dve sosednji eksperimentalni hudourniški porečji v bližini Ljubljane in sicer hudourniško območje Mačkov graben in hudourniško območje Kuzlovec; obe sta del porečja reke Gradašnice, ki se izliva v Ljubljanico in je del porečja reke Save. Opisane so nekatere osnovne topografske, geološke in hidrografske značilnosti obeh hudourniških območij, ki imajo velik vpliv na opazovane hidrološke procese, kot so padavine, generiranje površinskega odtoka ter premeščanje sedimentov.

Predstavljena je uporabljena merilna oprema ter nekatere značilnosti merilnih instrumentov. Nadalje so prikazani tudi nekateri preliminarni rezultati analiz pridobljenih hidroloških podatkov.

Na podlagi do sedaj pridobljenih podatkov lahko sklepamo, da konica sedimentograma v povprečju nastopi pred konico pretoka, kjer je časovni zamik znašal med 20 minutami ter 4 urami. Vrednosti časovnih zamikov so določene na podlagi do sedaj izmerjenih ter analiziranih dogodkov (11 dogodkov v vseh štirih letnih časih v obdobju od junija 2013 do avgusta 2014). Ta pojav je značilen za manjša porečja, kjer se potencialni viri sedimentov nahajajo relativno blizu struge oz. v strugi sami (Soler et al., 2008). Poleg tega je iz prikazanih rezultatov očitno, da imajo hidrometeorološki pojavi velikih intenzitet, kar so npr. ekstremni padavinski dogodki, nadpovprečen vpliv na fluvialno premeščanje suspendiranih snovi (npr. Bača, 2008, Soler et al., 2008).

Eksperimentalna porečja so ena izmed možnosti za pridobitev novih spoznanj, ki so povezana z opazovanim hidrološkim procesom. V prihodnje bomo meritve na eksperimentalnih hudourniških porečjih Mačkov graben in Kuzlovec nadaljevali z namenom, da zagotovimo daljše časovne serije hidroloških podatkov, kar bo omogočilo kakovostnejše hidrološke analize.

Zahvala

Terenske raziskave so potekale v okviru EU raziskovalnega projekta SedAlp, ki je financiran preko Alpine Space programa in iz raziskovalnega

programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Delo prvega avtorja je potekalo v okviru doktorskega izobraževanja in ga je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost. Za laboratorijsko analizo vzorcev vode se zahvaljujemo Renatu Babiču. Za recenzijo se zahvaljujemo dvema anonimnima recenzentoma.

Viri

Bača, P. (2008). Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. *Hydrological Sciences Journal*, **53**(1): 224–235.

Brilly, M., Mikoš, M., Petkovšek, G., Šraj, M., Kogovšek, J., Drobne, D. (2000). Eksperimentalno povodje reke Reke, Raziskave s področja geodezije in geofizike - 2000 : zbornik predavanj. *Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko*, 67–76 (in Slovenian).

Brilly, M., Mikoš, M., Petkovšek, G., Šraj, M., Kogovšek, J., Drobne, D., Štravs, L. (2002). The Experimental monitoring of water regime in the Reka river = Eksperimentalna opazovanja vodnega režima na reki Reki. *Acta carsologica*, **31**(1), 65–74.

Brilly, M., Globevnik, L., Štravs, L., Rusjan, S. (2005). Eksperimentalna porečja v Sloveniji, Raziskave s področja geodezije in geofizike - 2005 : zbornik predavanj. *Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko*, 47–59 (in Slovenian).

Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Penna, D., Borga, M., Matgen, P., Heitz, S. (2011). Investigation of the hydrologic response of three experimental basins across Europe, *Die Bodenkultur*, **62**(1-4), 31–37.

Coenders-Gerrits, A.M.J., Hopp, L., Savenije, H.H.G., Pfister, L. (2013). The effect of spatial throughfall patterns on soil moisture patterns at the hillslope scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**, 1749–1763.

Cvetko, P. (2013). Stream flow measurements with two different instruments. Unpublished diploma thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 62 p. (in Slovenian).

Globevnik, L. (2001). An integrated approach towards water management in catchments: an integrated analysis of time and spatial components of water regimes as the basis of modern procedures of modelling and planning of water management solutions, land use, and environmental protection: the Dragonja catchment.

Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 176 p. (in Slovenian)

Google Zemlja (2014). Dostopno na: <https://www.google.com/earth/> (10.09.2014).

Jesenovec, S. (1994). Poročanje časopisov o ujmi 8. Avgusta 1924. leta., *Mišičev vodarski dan 1994*, 34–37 (in Slovenian).

Lenzi, M.A., D'Agostino, V., Billi, P. (1999). Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon: Part I: Analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment, *Catena*, **36**(3), 171–190.

Mikoš, M. (1994). Pomen eksperimentalnih povodij za ugotavljanje vplivov gozda na vodni režim. V: ANKO, Boštjan (ur.). Gozd in voda : zbornik seminarja, Poljče, 11. - 13. oktober 1994 = Forest and water : workshop proceedings, Poljče, October 11 - 13, 1994. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo, 51–60.

Petan, S. (2010). Measurements and spatial modelling of rainfall erosivity of a soil erosion factor. Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 205 p. Dostopno na: <http://drugg.fgg.uni-lj.si/778> (10.09.2014) (in Slovenian).

Petan, S., Rusjan, S., Vidmar, A., Mikoš, M. (2010). The rainfall kinetic energy–intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the mediterranean part of Slovenia, *Journal of Hydrology*, **391**(3-4), 314–321.

Petkovšek, G. (2002). Quantification and modelling soil erosion with an application on the Dragonja watershed Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 205 p. (in Slovenian)

Petkovšek, G., Globevnik, L., Mikoš, M. (2003). Površinska erozija na eksperimentalnem povodju reke Dragonje - trendi v zadnjih 40 letih = Surface soil erosion in the experimental watershed of river Dragonja - trends in the past 40 years. *Gradbeni vestnik*, **52**(11), 276–281 (in Slovenian).

Petkovšek, G., Mikoš, M. (2003). Meritve erozijskih procesov v eksperimentalnem povodju Dragonje, JZ Slovenija = Measurements of erosion processes in the experimental catchment of the Dragonja river, SW Slovenia. *Acta hydrotechnica*, **21**(34), 37–56.

Rusjan, S., Fazarinc, R., Mikoš, M. (2003). River rehabilitation of urban watercourses on the example of the Glinščica river in Ljubljana. *Acta hydrotechnica*, **21**(34), 1–22.

Rusjan, S. (2008). Hydrological controls of nutrient mobilization in watersheds. Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 206 p. Dostopno na: <http://drugg.fgg.uni-lj.si/788> (10.09.2014) (in Slovenian).

Rusjan, S., Brilly, M., Mikoš, M. (2008). Flushing of nitrate from a forested watershed : an insight into hydrological nitrate mobilization mechanisms through seasonal high-frequency stream nitrate dynamics, *Journal of Hydrology*, **354(1-4)**, 187–202.

Soler, M., Latron, J., Gallart, F. (2008). Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees), *Geomorphology*, **98(1-2)**: 143–152.

Šraj, M. (2003). Modeling and measuring of rainfall interception Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 236 p. (in Slovenian)

Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. (2008a). Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia, *Agricultural and forest meteorology*, **148(1)**, 121–134.

Šraj, M., Rusjan, S., Petan, S., Vidmar, A., Mikoš, M., Globevnik, L., Brilly, M. (2008b). The experimental watersheds in Slovenia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **4**, 012051, 1–13.

Warmerdam, P., Stricker, H. (2010). Fundamental hydrological research results drawn from studies in small catchment, *IAHS Publ.*, 336, 47–53.